应用膜下灌排联动技术对提高土壤淋洗效果的影响

王东旺[1,2]， 王振华[1,2]， 陈 林[3]， 李文昊[1,2]

（1. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832000；2. 现代节水灌溉兵团重点实验室，新疆 石河子 832000；3. 新疆天业节水灌溉股份有限公司，新疆 石河子 832000）

摘 要： 膜下滴灌结合暗管排水技术是一种复合型节水灌排技术，为了进一步研究在新疆的影响，在新疆生产建设兵团141团安集海地区通过设置膜下滴灌结合暗管排水（T1）、膜下滴灌无暗管排水（T2）和无膜下滴灌无暗管排水（T3）3个不同处理进行棉花田间试验。结果表明：（1）相同土层下T1、T2、T3处理土壤含水率的变化幅度依次为6.32%、10.03%、14.32%，即：T1<T2<T3，表明T1处理较T2、T3处理能更好的保持土壤水分的稳定，不同处理下土壤的保水效果为T1>T2>T3；（2）T1处理在0~60 cm土层土壤含盐量均降低，20 cm、40 cm、60 cm土层土壤含盐量分别下降了63.06%、60.62%、48.42%；在棉花生育后期，T2处理在20 cm、40 cm土壤含盐量下降，60 cm土壤含盐量增加，即表层土壤脱盐会造成深层土壤积盐；T3处理生育期末期出现表层返盐现象；（3）棉花生育末期，T1处理下20 cm、40 cm、60 cm土层土壤有机质含量均增加，未铺设暗管的T2、T3处理有机质含量减少；（4）膜下滴灌结合暗管排水技术0~60 cm以内随土层深度增加土壤渗透性改善越好。（5）暗管排出水的pH、含盐量均大于灌溉水，说明暗管排水的同时带走了土壤中的盐分，有助于土壤盐碱的改良。

关键词： 棉花；膜下滴灌；暗管排水；盐分淋洗；新疆

目前资源和环境问题在人类发展过程中重视程度日趋增加[1]。中国作为世界上发展中国家之一，人口基数大，平均资源量匮乏，水资源短缺和土壤盐渍化已成为农业发展过程中重要的影响因素之一[2-4]。新疆作为我国较大的农业产地之一，每年农业耕作面积达到整个新疆土地面积的4.27‰，绿洲农业成为新疆人民生活和发展的基础。水资源的短缺和土壤盐渍化的日趋加重，造成了新疆可耕作农田的面积逐渐减少，耕地的质量逐渐降低，盐碱土地上种植作物的产量不断下降，严重制约了新疆农业和社会经济的可持续发展[5-6]。因此，在农业生产过程中需要提升农业灌溉用水利用系数并改善土地的耕作质量，这样才能增加耕作作物的产量，保证土地的可持续利用，改善人与水、耕地的矛盾，实现人与自然的和谐可持续发展。

新疆从1996年引进膜下滴灌技术[7]，应用研究表明，膜下滴灌技术在盐碱地上的应用效果较好，近20多年来得到了快速的发展，目前新疆应用膜下滴灌面积超过2×10^6 hm^2，新疆膜下滴灌作物种植中棉花种植面积突破全国的1/5，产量约占全国的1/3，是新疆种植面积最多的经济作物[8-9]。在盐渍化土地上应用膜下滴灌技术种植棉花时，土壤中水分、盐分的运移方式和普通模式存在一定的区别[10-11]。采用膜下滴灌技术可以将水分定时、定量的输送到作物根区附近，达到增产、节水的目的[12-13]，但膜下滴灌技术只能对土壤中盐分进行一定的调控，对作物根区0~40 cm土层形成盐分淡化区，使棉花在生育进程中减少盐渍化的影响，但并不能带走土壤中的盐分[14-15]。盐分会在湿润锋的边缘积累形成积盐区，随着膜下滴灌技术的长期使用，农田中“只灌不排”现象会使农田中40 cm以下土壤中总盐分逐渐增多，威胁农田的长期稳定高产，会使农田产生次

收稿日期： 2020-12-10； **修订日期：** 2021-04-22

基金项目： 国家自然科学基金项目（51869027）；石河子市重大科技项目（2018ZD03）；干旱区滴灌节水兵团科技创新团队项目（2019CB004）；兵团南疆重点产业创新发展支撑计划项目（202DB004）；师市平台项目：绿洲现代农业灌排技术与产品研发重点实验室（2019PT02）

作者简介： 王东旺（1990-），男，博士研究生，主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究. E-mail: 1339147708@qq.com

通讯作者： 王振华. E-mail: wzh2002027@163.com

生盐渍化。李文昊等[16]研究连续5 a应用膜下滴灌定点监测数据得出浅层土壤积盐现象严重。杨玉辉等[17]研究表明,按照新疆现行的灌溉制度及种植方式,耕作层土壤年均积盐0.36 g·kg^{-1},仅需15~40 a中度盐渍化农田中盐分的累积将达到重度(含盐量10~20 g·kg^{-1}),对绿洲的粮食安全和农业生态环境形成潜在威胁。与新疆相似,其他国家干旱、半干旱地区也存在同样的深层土壤盐分累积现象。为降低土壤中盐碱对作物的影响,通常过一段时间会用清水对土地进行大水漫灌淋洗,"盐随水走"地面淋洗只能将盐分向土壤深层淋洗并不能减少土壤中的总盐分含量[18-20],而且新疆水资源匮乏,大水漫灌会造成水资源的浪费,加剧水资源短缺的矛盾[21-22]。此外,大水漫灌还会造成地下水位的上升,淋洗到地下水中的盐分随着地下水通过毛管孔隙再次上升到土壤中,土壤中盐分增加的问题并未很好的解决[23-24]。因此,采用合理的措施有效减少土壤中的盐分对阻止土壤次生盐渍化具有重要的意义,传统的改良盐碱地方法有水利、农业、生物、化学等措施[25-28],其中水利工程改良措施中暗管排水技术能有效地改善土体的理化性质、降低地下水位,对改善土壤次生盐渍化具有一定的作用[29]。石培君等[30]研究得出经3次灌水淋洗后膜下滴灌暗管排盐量占0~80 cm土壤含盐量的28.90%。刘玉国等[31]研究得出浅层暗管排水与滴灌配套对轻度和中度土壤脱盐率可分别达到50.96%和90.89%。Bahceci等[32]研究得出,暗管排水3 a后,浅层土壤脱盐率高达80%。李显微等[33]对膜下滴灌和暗管排盐进行了数值模拟和分析,较好的模拟了排盐过程中水盐的运动状态。因此,本研究通过田间试验研究,探究膜下滴灌和暗管排水(灌排联动)下不同模式对土壤水分、盐分、土壤渗透系数等参数淋洗效果的影响,为新疆盐碱地膜下滴灌暗管排水技术的应用提供进一步的参考。

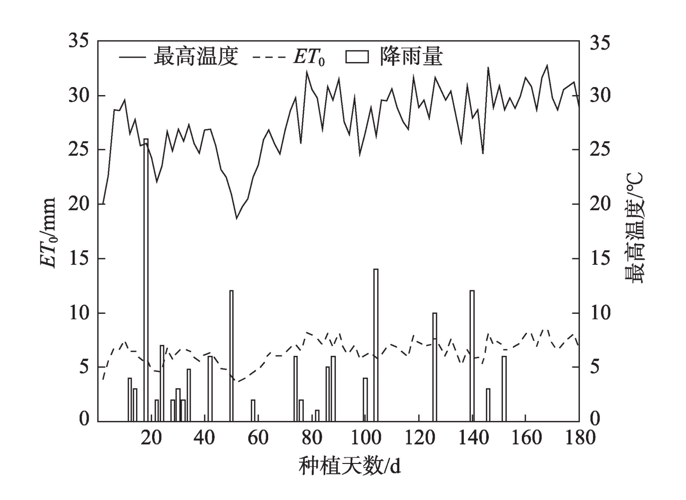
1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于2018年4—10月在新疆生产建设兵团141团安集海地区(85°21′47″E,44°36′29″N,海拔412 m)进行,总规划面积3.4 hm²。该地区降雨量少蒸发量大,地势南高北低,自然坡比4‰,0 ℃以上活动积温为4070 ℃,10 ℃以上活动积温为3649 ℃,年平均气温6.8 ℃,无霜期171 d,棉花生长季(5—10月)多年平均降雨量在182 mm左右,多年平均蒸发量1718 mm[34],地下水埋深8 m以下,年平均日照时数为2700 h,属西北干旱地区典型的温带大陆性气候[35],2018年棉花生长期内气象数据如图1所示。供试土壤为砂壤土,土壤耕作层平均有机质含量1.80 g·kg^{-1},初始含盐量1.20%~1.40%,土壤孔隙度40.90%,试验区前茬均为棉花,供试棉花品种为"农丰133号",生育期180 d左右,植株塔型,棉花植株之间通风透光好,且早熟、高产;试验区土壤物理指标如表1所示。

1.2　试验设计

设置3个试验小区,每个试验小区的面积为(15×10)m²,处理1为膜下滴灌技术结合暗管排水(灌排联动)种植,记为T1;处理2为膜下滴灌无暗管



注:ET_0表示参考作物蒸发蒸腾量。

图1　研究区气象数据

Fig. 1　Meteorological data of study area

表1　试验区土壤物理指标

Tab. 1　Physical condition of soil in test area

土层深度 /cm	土壤干容重 /(g·cm^{-3})	田间质量含水率/%	含盐量 /(g·kg^{-1})
0~10	1.45	22.89	7.14
10~20	1.46	20.49	6.93
20~30	1.52	20.88	8.25
30~40	1.53	20.62	8.81
40~50	1.54	20.37	9.66
50~60	1.59	20.87	9.34
60~70	1.67	21.51	11.12
70~100	1.63	21.70	9.23
平均值	1.55	21.17	8.81

排水种植(T2);处理3为普通对照种植,无膜下滴灌、无暗管排水(T3),每个处理设置3个重复。处理1和处理2均采用"一膜三管六行"棉花种植模式,滴灌带采用单翼迷宫式薄壁滴灌带,滴水流量2.6 L·h^{-1},滴孔间隔30 cm,棉花生长周期内,T1、T2处理具有相同的灌水施肥制度,棉花全生育期灌水11次,灌溉定额3600 m^3·hm^{-2},全生育期施用氮肥225 kg·hm^{-2},磷酸二铵140 kg·hm^{-2}。采用膜下滴灌方式进行灌水,灌溉间隔7~10 d,苗期灌水2次(含定苗水),蕾期灌水2次,花铃期灌水6次,吐絮成熟期灌水1次,灌溉的同时将肥料溶解于水中进行滴灌施肥。处理1小区内共埋3条暗管,间距5 m,埋深60 cm,设计坡度2‰。不同试验小区中间埋设防水塑料以避免相互之间产生影响。暗管采用直径为100 mm的PVC双壁波纹管,同一圆周均匀分布8个进水口,埋设暗管周围采用无纺布包裹以避免土壤颗粒进入暗管。棉花种植模式如图2所示。

1.3 数据测定与处理

1.3.1 土壤含水率 土壤水分的测定以每个生育期灌水前后为观测阶段,在每个试验小区间隔10 d用土钻采取棉花宽行、窄行和中间裸地3个点0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm土层土壤40 g左右置于铝盒中,每个取样点对应水平位置取3个重复点,将土样放在烘箱105 ℃下烘干6~8 h至恒重,采用烘干称重法测得土壤剖面0~60 cm各层土壤平均质量含水率。土壤含水率计算公式如下:

$$w = \frac{m - m1}{m1 - m2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:w为土壤含水率,%;m为土样湿重;$m1$为土样干重;$m2$为铝盒重。

1.3.2 土壤盐分测定 采用电导法进行土壤盐分的测定,在灌水前分别在宽行、窄行和膜间裸地进行取土,烘干研磨后过1 mm筛子,分别取20 cm、40 cm、60 cm土层土壤20 g,按照土和水1:5的比例配置成混合液,震荡均匀后静置2 h,然后过滤所得上清液,采用DDSJ-318型电导率仪测定其电导率$EC_{1:5}$(μS·cm^{-1}),灌溉水和暗管排出水同上测其电导率EC值。与含盐量S(g·kg^{-1})的关系可采用在该试验场地标定得到的换算曲线为:

$$S = 0.32EC_{1:5}/100 \quad (2)$$

1.3.3 土壤有机质测定 分别称取20 cm、40 cm、60 cm土层风干土样4 g于浸提瓶中,加入预先配置的土壤有机质浸提液20 mL,充分震荡摇匀5 min后过滤,采用TPY-7PC养分速测仪测定滤液中土壤的有机质含量。

1.3.4 土壤pH测定 分别取20 cm、40 cm、60 cm土层土壤20 g,将土壤样品与水1:1配置成悬浮液,搅动悬浮液3次,每次间隔约1 h,停止搅拌后立即采用pH计进行测量混合液的pH。

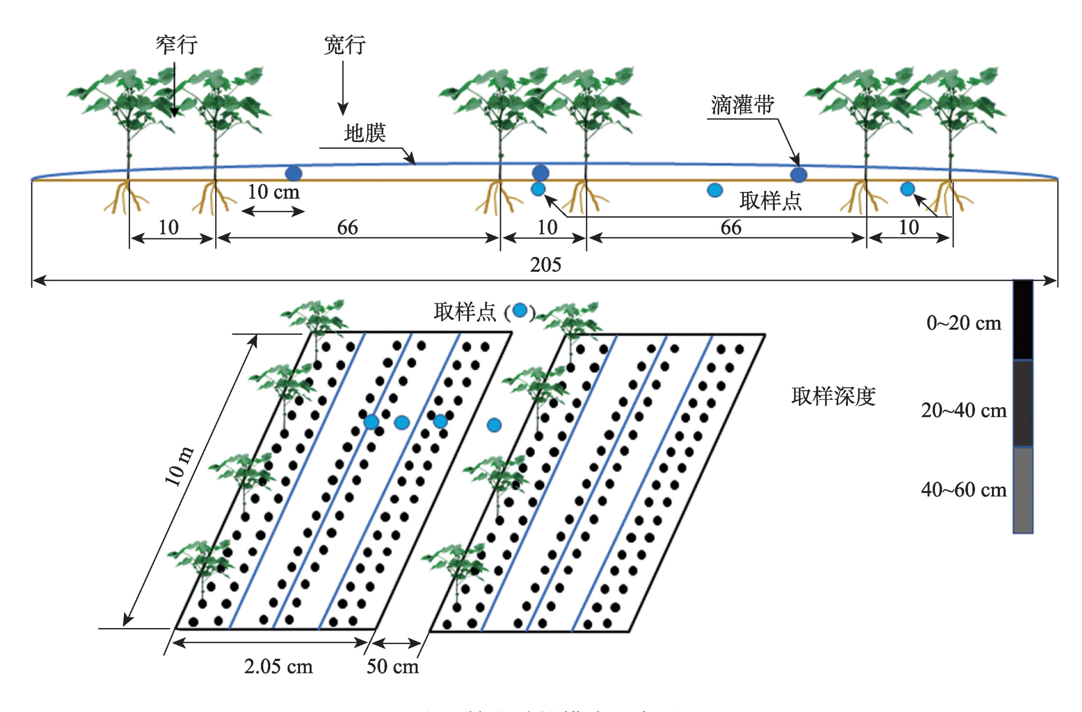


图2 棉花种植模式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cotton planting pattern

1.3.5　土壤渗透系数　采用室外双环入渗法进行土壤渗透系数(*K*)的测定。计算公式为：

$$K = QL/F(H + Z + L) \quad (3)$$

式中：*Q* 为稳定的渗入水量($cm^3 \cdot min^{-1}$)；*F* 为试坑内环的渗水面积(cm^2)；*Z* 为试坑内环中的水厚度(cm)；*H* 为毛细管压力(一般等于土壤毛细上升高度的一半)(cm)；*L* 为水的渗入深度(试验后开挖确定)(cm)。

1.4　数据处理

采用Excel 2010、SPSS 20.0和Origin 9.0对试验数据进行绘图处理和分析。

2　结果与分析

2.1　灌排联动不同模式对土壤水分分布规律的影响

由图3可以看出，灌排联动不同处理下同一土层土壤水分分布存在差异，土壤含水率的变化区间为6.01%~23.54%。棉花整个生育期中T1、T2处理下土壤含水率呈现一定的增加趋势，T3处理土壤含水率整体呈下降趋势，T3处理土层20 cm处含水率在8月15日左右突然增加，原因是受降雨的影响未覆膜小区表层土壤含水率受影响较大，总体而言T3处理不同土层土壤含水率在棉花生育期变化波动较大。相较T3处理T1、T2处理下含水率变化趋势更稳定，且T1、T2处理下土壤含水率高于T3处理；土层20 cm、40 cm范围内T1处理土壤含水率上升幅度略高于T2处理，相同土层下T1、T2、T3处理土壤含水率的变化幅度依次为：6.32%、10.03%、14.32%，即T1<T2<T3，表明T1、T2处理下土壤较T3处理有更好的保水保墒效果。说明覆膜可以减少土壤水分的蒸发，对土壤有更好的保水保墒效果，从不同处理同一土层土壤含水率分布可以看出：保水效果T1>T2>T3，原因是T1处理下膜下滴灌结合暗管排水改善了土壤中盐碱含量和土壤结构，增加了液体和气体的分布，土壤的理化性质得到改变使土壤不易板结，增加了土壤的透气性，改善了土壤中三相比例，进而在棉花生长进程中增加了土壤的持水量，有利于棉花的生长和产量的提高，因此T1处理膜下滴灌结合暗管排水较T2、T3对土壤持水量的增加和保持有更大的促进作用。

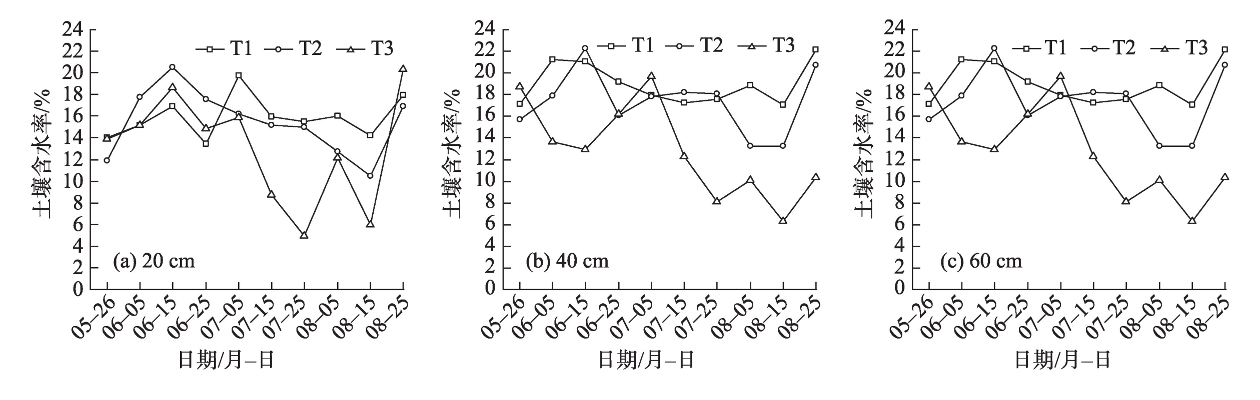


图3　同一土层不同处理土壤含水率变化趋势

Fig. 3　Change trend of soil moisture content in the same soil layer with different treatments

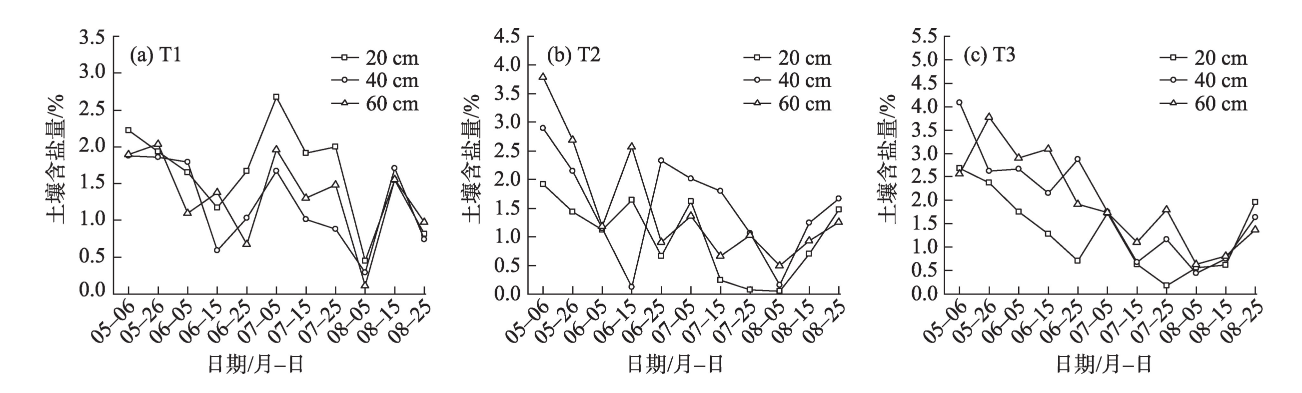


图4　相同处理不同土层深度盐分变化趋势

Fig. 4　Variation trend of salinity in different soil depths under the same treatment

2.2 灌排联动不同模式对土壤盐分淋洗效果的影响

图4显示了同一处理不同土层深度土壤含盐量的变化趋势，可知T1处理不同土层土壤盐分在蕾期之前呈现交替变化，在蕾期后20 cm、40 cm、60 cm土层土壤含盐量变化趋势相近。棉花生育期末尾不同土层深度土壤含盐量均低于初始盐分含量，整体来说土壤盐分含量呈下降趋势，说明膜下滴灌结合暗管排水技术可减少土壤中含盐量，原因是"盐随水走"，膜下滴灌水分入渗的同时将盐分带入深层土壤，当暗管在排出水分的同时也带走了土壤中盐分。将土壤中初始含盐量和棉花生育期结束时含盐量对比可得，20 cm、40 cm、60 cm土层土壤含盐量分别下降63.06%、60.62%、48.42%，灌排联动下不同土层土壤含盐量变化趋势相同且各个土层土壤脱盐显著，表明在灌排联动(T1)模式下表层土壤含盐量降低的同时下层土壤含盐量也会降低，可知膜下滴灌结合暗管排水技术具有较好的脱盐效果。T2处理下40 cm土层土壤盐分含量相比20 cm、60 cm土层变化幅度更大，整体而言，20 cm土层含盐量低于40 cm、60 cm土层，膜下滴灌降低了耕作层表层土壤含盐量；60 cm土层盐分含量呈先减少后增加的趋势。棉花吐絮成熟期停止灌水后由于水分蒸发作用各土层出现盐分增加现象，由T2可知，棉花生育后期20 cm、40 cm土壤含盐量上升幅度大于60 cm土壤含盐量，即膜下滴灌非灌溉期深层土壤盐分通过水分蒸发会向土壤中上层迁移。T3处理棉花苗期到花铃期后期表层土壤含盐量逐渐降低，吐絮成熟期后逐渐增加，由于降雨原因，表层土壤中盐分被淋洗并向深层运移，造成深层土壤中盐分含量增加。不覆膜不灌水模式下表层土壤脱盐的同时会造成深层土壤积盐，棉花生育后期停止灌水后，20 cm、40 cm、60 cm土层土壤含盐量均呈现上升的趋势。原因是棉花生育后期降水减少、蒸发强烈，水分蒸发的同时深层土壤盐分会随水分向表层运移，造成表层严重积盐现象。

2.3 灌排联动不同模式对不同深度土壤有机质含量的影响

图5显示了灌排联动不同模式下不同土层深度土壤有机质随时间的变化。土壤有机质是展现土壤肥力的主要指标，对T1、T2、T3处理进行数据分析可知，不同土层土壤有机质含量主要在0~6 g·kg^{-1}区间，土壤肥力较低；整体而言，灌排联动不同模式下棉花整个生育期土壤有机质含量呈先上升后下降的趋势，在棉花生育期末期，T1处理下20 cm、40 cm、60 cm土层土壤有机质含量均增加，分别增加了39.76%、14.49%、7.26%，原因是膜下滴灌结合暗管排水改善了土壤的通透性，为微生物分解植物残渣创造了条件，进而增加了土壤中有机质含量；而T2、T3处理在棉花生育中期有机质含量增加，原因是花铃期向棉花施肥进而增加了土壤中有机质含量，在棉花生育后期土壤有机质含量相比苗期呈现减少趋势，因为未铺设暗管小区棉花在生长过程中不断消耗土壤中的有机质，而土壤透气性差，微生物活动缓慢不能及时将植株残体分解为有机物，进而生育末期T2、T3处理土壤中有机质含量呈下降趋势。

2.4 灌排联动对土壤渗透性的影响

土壤渗透系数是阐明土壤渗透性强弱的主要物理参数之一。本研究分别在棉花苗期和吐絮成熟期测定灌排联动(T1)下土层20 cm、40 cm、60 cm的土壤渗透系数(图6)。由图6可知，棉花生育进程中无论苗期还是吐絮成熟期土壤渗透性20 cm>40 cm>60 cm，随着土层深度的增加土壤渗透性降低，

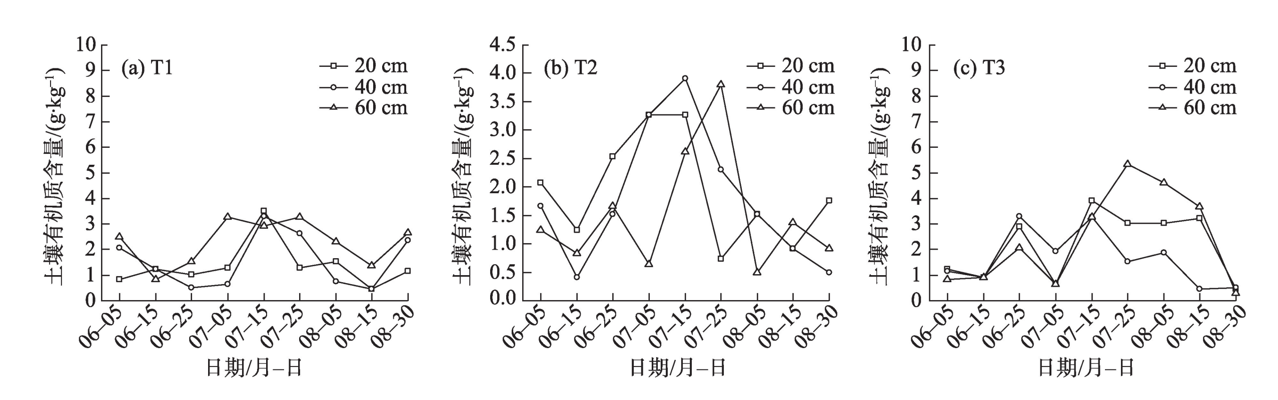


图5 灌排联动不同模式不同土层土壤有机质含量变化

Fig. 5 Changes of soil organic matter content in different soil layers under different irrigation and drainage modes

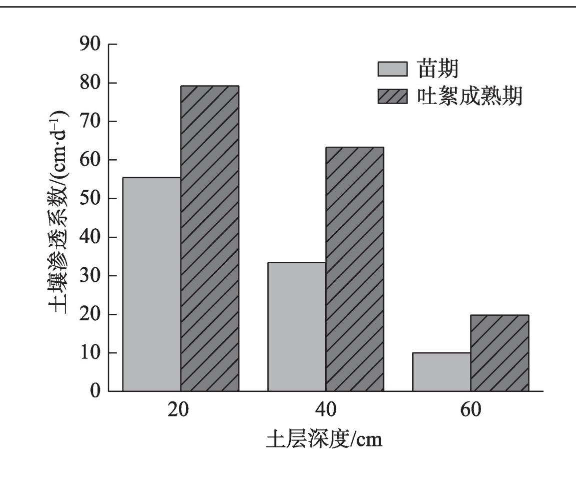


图6　T1处理生育期前后土壤渗透系数

Fig. 6　T1 treatment of soil permeability before and after growth period

且不同土层土壤渗透系数间呈现显著性差异。棉花吐絮成熟期不同土层土壤渗透系数大于苗期土壤渗透系数，表明后期土壤渗透系数得到较好的改善，20 cm、40 cm、60 cm土层土壤渗透系数分别增加了42.87%、89.30%、97.50%，0~60 cm以内随土层深度增加土壤渗透系数改善越好。可得出膜下滴灌结合暗管排水技术可以有效的提升土壤的渗透性，有利于作物的生长和产量的提高。

2.5　灌排联动对土壤暗管排水水质的影响

分别测定6月25日、7月15日、8月5日灌溉水和暗管排出水的pH及含盐量(图7)，由图7可知，6月25日、7月15日、8月5日暗管排出水的pH均大于灌溉水，表明暗管在排水的同时带走了土壤中的盐分，进而使pH增加，说明暗管排水能很好地降低土壤中的盐分离子有助于土壤的改良。由图7a可知，暗管出水和灌溉水pH之间呈现显著性差异；从图7b中可以更明显的看出，暗管排出水的含盐量均大于灌溉水的盐分含量，且二者之间呈现显著性差异，3次暗管排出水盐分含量分别增加了33.87%、24.88%、54.59%，说明膜下滴灌结合暗管排水技术模式是盐碱地种植作物的较好的选择，并能够在一定程度上对盐碱地进行改良，有效降低土壤中的盐分含量。

3　讨 论

膜下滴灌被认为一种湿润范围小、不产生深层渗漏、浅灌、勤灌的灌溉方式，不能将盐分从土层带入地下水中，随着使用年限的增加进而会造成土壤中盐分的积累[36]；加上淡水资源短缺，采用微咸水等灌溉方式加剧了土层中盐分的含量，为缓解水分短缺和土壤次生盐渍化对农业生产带来的影响，很多学者针对不同条件下膜下滴灌结合暗管排水措施对土壤理化性质、地下水位以及土壤脱盐效果进行了研究。石培君等[30]研究得出暗管排盐量占0~80 cm土壤含盐量的28.90%；刘洪光等[30, 37]研究得出0~200 cm土层深度，暗管取样点在8 m，16 m，24 m位置土壤总盐分别降低了42.99%、36.84%、24.41%，根系层土壤总盐含量分别降低了50.34%、40.7%、30.76%；本试验中膜下滴灌结合暗管排水模式下20 cm、40 cm、60 cm土层土壤含盐量分别下降了63.06%、60.62%、48.42%。表明滴灌条件下水分入渗的同时将盐分带入深层土壤，经过暗管在排出水分的同时也带走了土壤中盐分。杨玉辉等[17]研究得出，铺设暗管棉花生育末期土壤含盐量相比播前降低了16%~43%；刘玉国等[31]得出，未铺设暗管

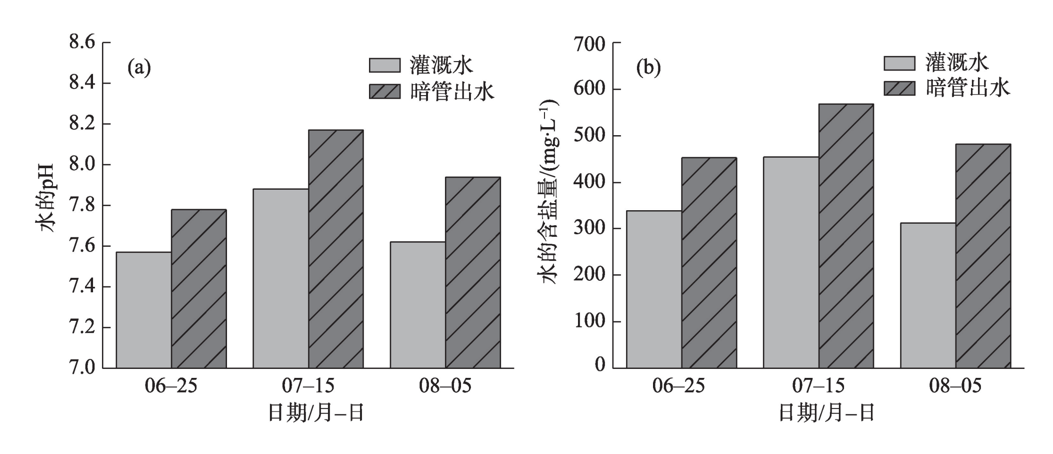


图7　灌溉水和暗管出水的pH及含盐量变化

Fig. 7　Changes of pH and salt content of irrigation water and subsurface pipe effluent

土壤含盐量上升28%。因此,铺设暗管能为棉花生育期内提供适宜的生长环境。

膜下滴灌结合暗管排水技术布置模式对土壤水分分布、盐分淋洗、土壤有机质含量、土壤渗透系数和土壤暗管水水质有显著影响。暗管排水的矿化度和电导率远大于灌溉水,塔吉姑丽·达吾提等[38]研究得出6月、8月和10月暗管排出水的矿化度分别是灌溉水的8.33倍、8.58倍和10.76倍,电导率分别是灌溉水的4.83倍、6.22倍和5.38倍。本试验研究得出,暗管排出水的pH、含盐量均大于灌溉水,分别增加了2.77%、3.68%、4.20%和33.87%、24.88%、54.59%,且均呈现显著性差异,说明暗管排水的同时带走了土壤中的盐分离子,降低土壤含盐量,为盐碱地的改良提供了一定的理论基础。艾天成[39]采用对比法得出暗管排水能有效降低地下水位和改善耕层土壤物理环境,本研究得出铺设暗管T1处理后期相比苗期土壤渗透系数得到较好的改善,20 cm、40 cm、60 cm土层土壤渗透系数分别增加了42.87%、89.30%、97.50%,0~60 cm以内随土层深度增加土壤渗透系数改善越好。暗管排水对土壤淋洗效果受多种因素影响,受不同暗管管径、暗管间距、暗管埋深等因素的影响,应针对不同程度的盐渍化土壤,制定合理的暗管埋设深度和间距,达到有效的脱盐效果。

4 结 论

本文通过田间试验探究了灌排联动下不同模式对土壤水分、盐分、土壤渗透性及土壤淋洗效果的影响,得出如下结论。

(1) 相同土层下T1、T2、T3处理土壤含水率的变化幅度依次为:6.32%、10.03%、14.32%,即T1<T2<T3,表明T1、T2处理较T3处理能更好的保持土壤水分的稳定;不同处理下土壤的保水效果为T1>T2>T3,原因是膜下滴灌结合暗管排水技术可以改善土壤的理化性质和固、液、气三相的比例,增加土壤的透气性。

(2) 膜下滴灌结合暗管排水处理可减少土壤中含盐量,原因是"盐随水走",暗管在排出水分的同时也带走了土壤中盐分,在0~60 cm土层土壤含盐量均降低;膜下滴灌无暗管排水处理棉花生育后期20 cm、40 cm土壤含盐量下降而60 cm土壤含盐量增加,即表层土壤脱盐会造成深层土壤积盐;无覆膜无灌水处理生育期末期出现表层返盐现象。

(3) 棉花生育末期T1处理下20 cm、40 cm、60 cm土层土壤有机质含量均增加,而未铺设暗管的T2、T3处理有机质含量减少;膜下滴灌结合暗管排水技术0~60 cm以内随土层深度增加土壤渗透性改善越好;暗管排出水的pH、含盐量均大于灌溉水,分别增加了2.77%、3.68%、4.20%和33.87%、24.88%、54.59%,且均呈现显著性差异,说明暗管排水的同时带走了土壤中的盐分,降低了土壤中的含盐量,为盐碱地的改良提供了一定的理论基础。

参考文献(References):

[1] 罗毅. 干旱区绿洲滴灌对土壤盐碱化的长期影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(8): 1679−1688. [Luo Yi. Long term effects of drip irrigation on soil salinization in Arid Oasis[J]. Chinese Science: Earth Science, 2014, 44(8): 1679−1688.]

[2] 王久林. 暗管排水技术在灌排渠系中的应用[J]. 东北水利水电, 1988(9): 33−36. [Wang Jiulin. Application of subsurface drainage technology in irrigation and drainage canal system[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 1988(9): 33−36.]

[3] 万长宇, 张展羽, 冯根祥, 等. 暗管排水条件下微咸水灌溉对土壤水盐运移特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3): 37−41. [Wang Changyu, Zhang Zhanyu, Feng Genxiang, et al. Transport feature of soil water-salt by saline water irrigation under subsurface pipe drainage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(3): 37−41.]

[4] 张开祥, 马宏秀, 孟春梅, 等. 竖井排盐对南疆枣田土壤盐分运移的影响[J]. 节水灌溉, 2018, 279(11): 81−85. [Zhang Kaixiang, Ma Hongxiu, Meng Chunmei, et al. Effect of shaft salt drainage on soil salt transport in Jujube farmland of Southern Xinjiang[J]. Water Saving Irrigation, 2018, 279(11): 81−85.]

[5] 王天宇, 王振华, 陈林, 等. 灌排一体化工程对地下水埋深及作物生长影响的研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 174−180. [Wang Tianyu, Wang Zhenhua, Chen Lin, et al. Literature review on the influence of integrated irrigation and drainage project on groundwater depth and crop growth[J]. Journal of Water Resources Water Engineering, 2020, 31(4): 174−180.]

[6] 刘广明, 杨劲松, 吕真真, 等. 不同调控措施对轻中度盐碱土壤的改良增产效应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 164−169. [Liu Guangming, Yang Jingsong, Lyu Zhenzhen, et al. Effects of different adjustment measures on improvement of light-moderate saline soils and crop yield[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 164−169.]

[7] 徐飞鹏, 李云开, 任树梅. 新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展的思考[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 25−27. [Xu Feipeng, Li

Yunkai, Ren Shumei. Investigation and discussion of drip irrigation under mulch in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 25–27.]

[8] 李显溦, 左强, 石建初, 等. 新疆膜下滴灌棉田暗管排盐的数值模拟与分析Ⅰ: 模型与参数验证[J]. 水利学报, 2016, 47(4): 79–86. [Li Xianwei, Zuo Qiang, Shi Jianchu, et al. Evaluation of salt discharge by subsurface pipes in the cotton field with film mulched drip irrigation in Xinjiang, China I. Calibration to models and parameters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(4): 79–86.]

[9] 秦文豹, 李明思, 李玉芳, 等. 滴灌条件下暗管滤层结构对排水、排盐效果的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 80–85. [Qin Wenbao, Li Mingsi, Li Yufang, et al. Proposed gravel filters for pipe-drain to improve the efficacy of the drainage system under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(7): 80–85.]

[10] 衡通. 暗管排水对滴灌农田水盐分布的影响研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018. [Heng Tong. Influence of Pipe Drainage on Water and Salt Distribution in Drip Irrigation Farmland[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.]

[11] 衡通, 王振华, 李文昊, 等. 滴灌条件下排水暗管埋深及管径对土壤盐分的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 111–121. [Heng Tong, Wang Zhenhua, Li Wenhao, et al. Impacts of diameter and depth of drainage pipes in fields under drip irrigation on soil salt[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(1): 111–121.]

[12] 王东旺, 吕廷波, 何新林, 等. 不同覆膜宽度对棉花土壤水分及地温的影响研究[J]. 节水灌溉, 2018(12): 33–37, 43. [Wang Dongwang, Lyu Tingbo, He Xinlin, et al. Effects of different film width on soil moisture and soil temperature of cotton[J]. Water Saving Irrigation, 2018(12): 33–37, 43.]

[13] 李文昊, 王振华, 郑旭荣, 等. 长期膜下滴灌棉田土壤盐分变化特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 67–74. [Li Wenhao, Wang Zhenhua, Zheng Xurong, et al. Soil salinity variation characteristics of cotton field under long-term mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(10): 67–74.]

[14] 高金花, 张礼绍, 廉冀宁, 等. 膜下滴灌结合暗管技术土壤水盐特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(9): 76–82. [Gao Jinhua, Zhang Lishao, Lian Jining, et al. Research on the soil water and salt change characteristics of drip irrigation under film combined with drainage technology of underground pipeline[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(9): 76–82.]

[15] Corradini F, Najera F, Casanova M, et al. Effects of maize cultivation on nitrogen and phosphorus loadings to drainage channels in Central Chile[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2015, 187(11): 1–17.

[16] 李文昊, 王振华, 郑旭荣, 等. 新疆绿洲盐碱地滴灌条件下地下水局部动态对荒地盐分的影响[J]. 干旱区研究, 2016, 33(5): 1110–1118. [Li Wenhao, Wang Zhenhua, Zheng Xurong, et al. Effects of local dynamic change of groundwater on soil salinity in wasteland under drip irrigation in saline or alkaline land of oasis in Xinjiang [J] Arid Zone Research, 2016, 33(5): 1110–1118.]

[17] 杨玉辉, 周新国, 李东伟. 暗管排水对南疆高水位膜下滴灌棉田盐分管控及淋洗效果分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1194–1204. [Yang Yuhui, Zhou Xinguo, Li Dongwei. Analysis of the effect of subsurface pipes on salt control and leaching in drip irrigation under a mulch cotton field at high groundwater level in Southern Xinjiang by subsurface pipes[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1194–1204.]

[18] 李开明, 刘洪光, 石培君, 等. 明沟排水条件下的土壤水盐运移模拟[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1299–1307. [Li Kaiming, Liu Hongguang, Shi Peijun, et al. Simulation of soil water and salt migration under open-ditch drainage[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(6): 1299–1307.]

[19] Wang Z, Heng T, Li W, et al. Effects of subsurface pipe drainage on soil salinity in saline-sodic soil under mulched drip irrigation [J]. Irrigation and Drainage, 2020, 69.

[20] Peng S, Luo Y, Xu J, et al. Integrated irrigation and drainage practices to enhance water productivity and reduce pollution in a rice production system[J]. Irrigation & Drainage, 2012, 61(3): 285–293.

[21] 王振华, 衡通, 李文昊, 等. 滴灌条件下排水暗管间距对土壤盐分淋洗的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 253–261. [Wang Zhenhua, Heng Tong, Li Wenhao, et al. Effects of drainage pipe spacing on soil salinity leaching under drip irrigation condition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 253–261.]

[22] Munis M F H, Tu L, Ziaf K, et al. Critical osmotic, ionic and physiological indicators of salinity tolerance in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) for cultivar selection[J]. Pakistan Journal of Botany, 2010, 42(3): 1685–1694.

[23] 陈丽娟, 冯起, 张新民, 等. 明沟排水洗盐条件下土壤水盐动态模拟研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 241–244. [Chen Lijuan, Feng Qi, Zhang Xinmin, et al. Simulation study on dynamic of soil water and salt of salt leaching with drainage ditch[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(1): 241–244.]

[24] 王少丽, 杨继富, 李杰, 等. 新疆盐渍化灌区水盐平衡现状及对策[J]. 中国农村水利水电, 2006(4): 12–15. [Wang Shaoli, Yang Jifu, Li Jie , et al. Status and countermeasure study on water-salt balance of irrigation district with salinization in Xinjiang Province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(4): 12–15.]

[25] 薛永贵. 暗管排水技术对土地改良和农田生态系统改进的应用效果分析[J]. 农民致富之友, 2017(13): 165. [Xue Yonggui. Application effect analysis of subsurface drainage technology on land improvement and farmland ecosystem improvement[J]. Friends of Farmers Getting Rich, 2017(13): 165.]

[26] Bhusal N, Kim H S, Han S G, et al. Photosynthetic traits and plant-water relations of two apple cultivars grown as bi-leader trees under long-term waterlogging conditions[J]. Environmental and Ex-

perimental Botany, 2020, 176: 104-111.

[27] Feng G, Zhang Z, Zhang Z. Evaluating the sustainable use of saline water irrigation on soil water-salt content and grain yield under subsurface drainage condition[J]. Sustainability, 2019, 11 (22): 6431.

[28] Satyanarayana T V, Boonstra J. Subsurface drainage pilot area experiences in three irrigated project commands of Andhra Pradesh in India[J]. Irrigation & Drainage, 2010, 56(S1): S245-S252.

[29] 张金龙, 张清, 王振宇, 等. 排水暗管间距对滨海盐土淋洗脱盐效果的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 85-89. [Zhang Jinlong, Zhang Qing, Wang Zhenyu, et al. Effect of subsurface drain spacing on elution desalination for coastal saline soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (9): 85-89.]

[30] 石培君, 刘洪光, 何新林, 等. 膜下滴灌暗管排水规律及土壤脱盐效果试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(7): 726-730. [Shi Peijun, Liu Hongguang, He Xinli, et al. Experiments on drainage rule and soil desalination effect under mulched subsurface pipe drainage[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(7) : 726-730.]

[31] 刘玉国, 杨海昌, 王开勇, 等. 新疆浅层暗管排水降低土壤盐分提高棉花产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 84-90. [Liu Yuguo, Yang Haichang, Wang Kaiyong, et al. Shallow subsurface pipe drainage in Xinjiang lowers soil salinity and improves cotton seed yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(16): 84-90.]

[32] Bahceci Idris, Nacar A S. Subsurface drainage and salt leaching in irrigated land in south-east Turkey[J]. Irrigation & Drainage, 2008, 58(3): 346-356.

[33] 李显溦, 左强, 石建初, 等. 新疆膜下滴灌棉田暗管排盐的数值模拟与分析 Ⅰ: 模型与参数验证[J]. 水利学报, 2016, 47(4): 537-544. [Li Xianwei, Zuo Qiang, Shi Jianchu, et al. Evaluation of salt discharge by subsurface pipes in the cotton field with film mulched drip irrigation in Xinjiang, China I. Calibration to models and parameters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(4): 537-544.]

[34] 辛明亮, 吕廷波, 何新林, 等. 玛河灌区膜下滴灌棉田表层土壤盐分空间变异性[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 74-79. [Xin Mingliang , Lyu Tingbo, He Xinlin , et al. Spatial variation of surface soil salinity in under-film drip irrigating of cotton field in irrigated areas of Manas River Basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(4): 74-79.]

[35] 曹玉斌, 何新林, 吕廷波, 等. 基于参考作物法的玛河灌区棉花耗水强度研究[J]. 节水灌溉, 2017(5): 90-92. [Cao Yubin, He Xinlin, Lyu Tingbo, et al. Research on water consumption intensity of cotton at Manasi River irrigation based on reference crop method[J]. Water Saving Irrigation, 2017(5): 90-92.]

[36] 赵永成, 虎胆·吐马尔白, 马合木江·艾合买提, 等. 冻融期膜下滴灌棉田土壤温度盐分迁移特征[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 141-145. [Zhao Yongcheng, Hudan Tumarbay, Mahemujiang Aihemaiti, et al. Study on movement characteristics of soil temperature and salt during freeze-thaw period[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(2): 141-145.]

[37] 刘洪光, 何新林, 李明思, 等. 膜下滴灌盐碱地排水工程控盐效果试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(4): 347-353. [Liu Hongguang, He Xinlin, Li Mingsi, et al. Experimental study on salt controlling effect in drainage system in saline-alkali land with drip irrigation under mulch[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME), 2018, 36(4) : 347-353.]

[38] 塔吉姑丽·达吾提, 罗浩, 吕双庆, 等. 暗管排水条件下南疆农田排水矿化度和电导率的动态变化研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(12): 80-87. [Tajigul Dawut, Luo Hao, Lyu Shuangqin, et al. Research on the dynamic change of conductivity and salinity in the farms of Southern Xinjiang under the underground pipe drainage condition[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(12): 80-87.]

[39] 艾天成. 涝渍地土壤改良技术研究与应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2004. [Ai Tiancheng. Study on the Improvement Technique for Waterlogged Land[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.]

Effect of drip irrigation under mulch combined with drainage by concealed pipes on soil leaching in Xinjiang

WANG Dongwang[1,2], WANG Zhenhua[1,2], CHEN Lin[3], LI Wenhao[1,2]

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Modern Water Saving Irrigation of Xinjiang Bingtuan, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Tianye Water-Saving Irrigation Co. LTD, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: Drip irrigation under film combined with subsurface drainage technology is a type of composite water-saving irrigation and drainage technology. We conducted field experiments in the Anjihai area of 141 production and construction corporations of Xinjiang using three different treatments to study the effect of the technology of drip irrigation under mulch combined with the drainage of underground pipes on the soil leaching effect: Drip irrigation under mulch combined with the drainage of underground pipes (T1), drip irrigation under mulch without the drainage of underground pipes (T2), and drip irrigation without the drainage of underground pipes (T3). We found that under the same soil layer, the changes in the soil moisture content of T1, T2, and T3 treatments were 6.32%, 10.03%, and 14.32%, respectively, which indicated that the T1 treatment could better maintain the stability of soil moisture than the T2 and T3 treatments, and the soil water conservation effect of different treatments was T1>T2>T3. The soil salt content of the 0−60 cm soil layer decreased in the T1 treatment, and it was 63.06%, 60.62%, and 48.42% in the 20 cm, 40 cm, and 60 cm soil layers, respectively. The soil salt content of the 20 cm and 40 cm soil layers decreased in the T2 treatment, but it increased in the 60 cm soil layer, indicating that desalination of the surface soil caused salt accumulation in the deep soil layer, and the surface salt returned in the T3 treatment, at the end of growth period. At the end of the cotton-growing period, the content of soil organic matter increased in the 20 cm, 40 cm, and 60 cm soil layers, but it decreased in the T2 and T3 soil layers without concealed pipes. With the increase in soil depth, the permeability of the soil improved within 0−60 cm. The pH and salt content of the water discharged by the concealed pipe were higher than that of the irrigation water, which indicates that the concealed pipe drained away the salt in the soil at the same time, which is helpful for the improvement of soil salinity and alkalinity. The study provides a theoretical basis for the improvement and management of saline, alkali land in Xinjiang.

Keywords: cotton; drip irrigation under mulch; concealed pipe drainage; salt leaching; Xinjiang